

Die Stratosphäre im globalen Wandel

H. Fischer, IMK

Einleitung

Zum besseren Verständnis des Folgenden gehen wir zunächst kurz auf den vertikalen Aufbau der Atmosphäre ein, der für mittlere Breiten in Abb. 1 schematisch dargestellt ist:

Etwa 80 % der gesamten Masse der Atmosphäre befinden sich in der Troposphäre, in der sich das Wettergeschehen abspielt. Sichtbare Anzeichen dafür sind Wasserwolken und Regen, sowie bei tiefen Temperaturen in großer Höhe die Bildung feiner Eiswolken (Zirren). Die Troposphäre wird durch Konvektion vertikal gut durchmischt, wobei sich aufsteigende Luft wegen der exponentiellen Druckabnahme mit der Höhe adiabatisch stark abkühlt. Die Abnahme der Temperatur mit der Höhe ist in der Troposphäre nahezu linear (Abb. 1).

In der Tropopause, einer dünnen Schicht am oberen Rand der Troposphäre, ändert sich das Temperaturprofil dramatisch. Das darüber liegende „Stockwerk“ der Atmosphäre bis in etwa 50 km Höhe heißt Stratosphäre, weil hier wegen des stark geänderten Temperaturverlaufs die Durchmischung übereinander liegender Luftschichten weitgehend unterbunden ist. Aus dem gleichen Grund bildet die Tropopause eine sehr wirksame Barriere gegen das Eindringen von feuchter und verschmutzter Luft aus der Troposphäre in die extrem trockene Stratosphäre, die nur noch etwa 0,0005 Volumen-% Wasserdampf enthält. Die Stratosphäre ist daher weitgehend wolkenfrei. Davon ausgenommen sind nur die Polgebiete: Über ihnen kann sich im

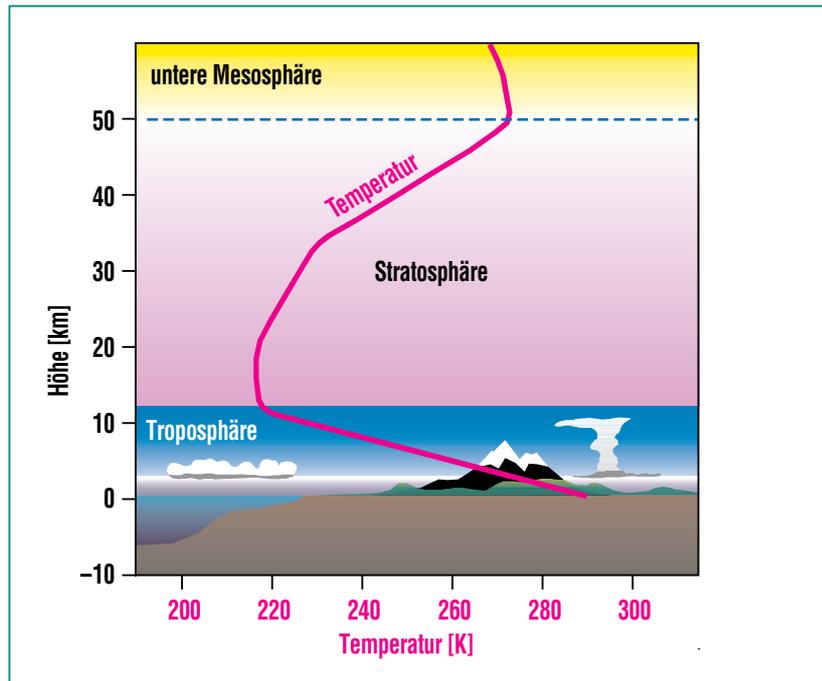


Abb. 1: Aufbau der Erdatmosphäre (schematisch, für mittlere Breiten). Die Tropopause, also die schmale Übergangszone zwischen der Troposphäre und der Stratosphäre, ist in hohen Breiten nach unten verschoben. Am Äquator, wo sie bis auf ca. 17 km angehoben ist, ist die Tropopause am kältesten.

Winter die Stratosphäre so extrem abkühlen, dass selbst der wenige noch vorhandene Wasserdampf zusammen mit Salpetersäuredampf an feinen Aerosolpartikeln kondensiert und dünne „Polare Stratosphärische Wolken“ (PSC) bildet.

Am oberen Rand der Stratosphäre ist der Druck bereits unter 0,1% des Standarddrucks auf Meereshöhe abgefallen, weshalb die darüber beginnende Mesosphäre und alle höheren „Stockwerke“ der Atmosphäre zusammen genommen nur noch einen geringen Anteil der gesamten Luftmasse enthalten.

Mehr als 90 % des gesamten atmosphärischen Ozons (O_3) befinden sich in der Stratosphäre, wo

es durch die Einwirkung von kurzwelliger Sonnenstrahlung auf molekularen Sauerstoff erzeugt wird. Vor allem dieser hohe Ozongehalt sorgt dafür, dass die Temperatur in der Stratosphäre mit der Höhe wieder ansteigt (Ausnahme: untere polare Stratosphäre), denn O_3 absorbiert selbst einen Teil des Sonnenlichtes und verwandelt es in Wärme. Gleichzeitig schützt das stratosphärische „Ozonschild“ das Leben auf der Erde vor dem schädlichen UV-B-Anteil des Sonnenlichtes, den es nahezu vollständig herausfiltert.

Die Entdeckung des Ozonlochs über der Antarktis Mitte der 80er Jahre hat deutlich gemacht, dass die Schutzfunktion des „Ozonschildes“ vor allem durch anthro-

pogene Emissionen flüchtiger chlor- und bromhaltiger Verbindungen gefährdet wird. Auch andere Anzeichen deuten darauf hin, dass sich die Stratosphäre in einem globalen Wandel befindet, der sowohl anthropogene als auch natürliche Ursachen haben kann. Der Wandel äußert sich z.B. in Veränderungen der räumlichen Temperatur- und Wasserdampfverteilung. Seit über 20 Jahren steigt der Wasserdampfgehalt der unteren Stratosphäre um etwa 1% pro Jahr an, was zu starken Änderungen der dynamischen, chemischen und strahlungsbedingten Prozesse in der Atmosphäre führen kann. Nicht zuletzt deswegen steht nach wie vor der weltweite Abbau des Ozons in der Stratosphäre im Zentrum der Forschungsaktivitäten.

Unter den Wissenschaftlern ist allgemein akzeptiert, dass der globale Wandel der Atmosphäre sich stärker in den oberen Schichten als den bodennahen auswirkt. Die Ursachen der stratosphärischen Veränderungen sind uns aber nur teilweise bekannt; demnach bleibt genügend Raum für bedeutsame wissenschaftliche Arbeiten.

Der Ozonabbau

Bereits Anfang der 70er Jahre hatten amerikanische Wissenschaftler den Abbau des stratosphärischen Ozons aufgrund der Photolyse von Fluorchlorkohlenwasserstoffen in der Stratosphäre postuliert. Es dauerte dann etwa 10 Jahre bis sich die UN-Völkergemeinschaft zum „Wiener Übereinkommen zum Schutze der Ozonschicht“ durchgerungen hatte. Bei einer solchen Absichtserklärung

ohne feste Reduktionsszenarien für Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) wäre es vermutlich geblieben, wenn nicht englische Wissenschaftler 1985 das Ozonloch über der Antarktis entdeckt hätten. Dieser Effekt überraschte selbst die Wissenschaftler, die zunächst keine Erklärung für das Ozonloch hatten.

Durch intensive antarktische Messkampagnen mit Flugzeugen, Sondierungen an Messstationen und Satellitenmessungen wurde in der Folgezeit eine Datenbasis geschaffen, auf der rasch neue Theorien über den Ozonabbau entwickelt werden konnten. Es stellte sich schließlich heraus, dass die bereits erwähnten Polaren Stratosphärischen Wolken (PSC) eine wichtige Rolle spielen und die FCKW auch in diesem Fall die eigentliche Ursache des Ozonabbaus sind.

Inzwischen liegen Messungen der atmosphärischen Zustandsparameter und der Konzentration von einer Reihe von Spurenstoffen in globalem Maßstab vor und es gibt eine Hierarchie von numerischen Modellen, mit denen die Atmosphäre über unterschiedliche Zeitintervalle simuliert werden kann. Trotz großer Fortschritte im Verständnis der Vorgänge zeigen die Vergleiche von Messungen mit simulierten Parameterverteilungen immer noch erhebliche Diskrepanzen unter arktischen Bedingungen. Auch der Abbau des Ozons in mittleren nördlichen Breiten, die für uns von zentralem Interesse sind, kann nach wie vor nicht zufriedenstellend durch numerische Modelle wiedergegeben werden.

Ziel aller wissenschaftlichen Untersuchungen muss es sein, atmosphärische Modelle bereitzustellen, mit denen zuverlässige Vorhersagen der Entwicklung der Ozonschicht in den kommenden Jahrzehnten möglich werden. Heute werden bereits mit einer Reihe von Modellen Vorhersagen gemacht, jedoch sind deren Unsicherheiten noch deutlich zu groß. Zu den noch nicht entsprechend gut parametrisierten Prozessen zählen zum einen Transportprozesse zwischen den tropischen und arktischen Breiten sowie zwischen Troposphäre und Stratosphäre. Zum anderen sind es mikrophysikalische Prozesse bei der Bildung und Veränderung der PSCs und Prozesse innerhalb der diese umgebenden Luft.

Kürzlich durchgeführte Vergleiche von Ozon-Vorhersagen atmosphärischer Modelle für den arktischen Bereich zeigen eine erhebliche Streuung (Abb. 2) und bestätigen damit die oben gemachte Aussage über die ungenügende Qualität der numerischen Modelle. Um die beschriebenen Probleme einer Lösung näher zu bringen, müssen die Datenbasis ergänzt und durch Vergleich von Modellergebnissen mit gemessenen Parameterverteilungen die Parametrisierung relevanter stratosphärischer Prozesse verbessert werden.

Messung stratosphärischer Parameter

Lücken in den stratosphärischen Messdaten gibt es insbesondere bei den Spurengasen, beim Aerosol und bei Wolkenpartikeln. Das IMK-ASF hat sich seit geraumer

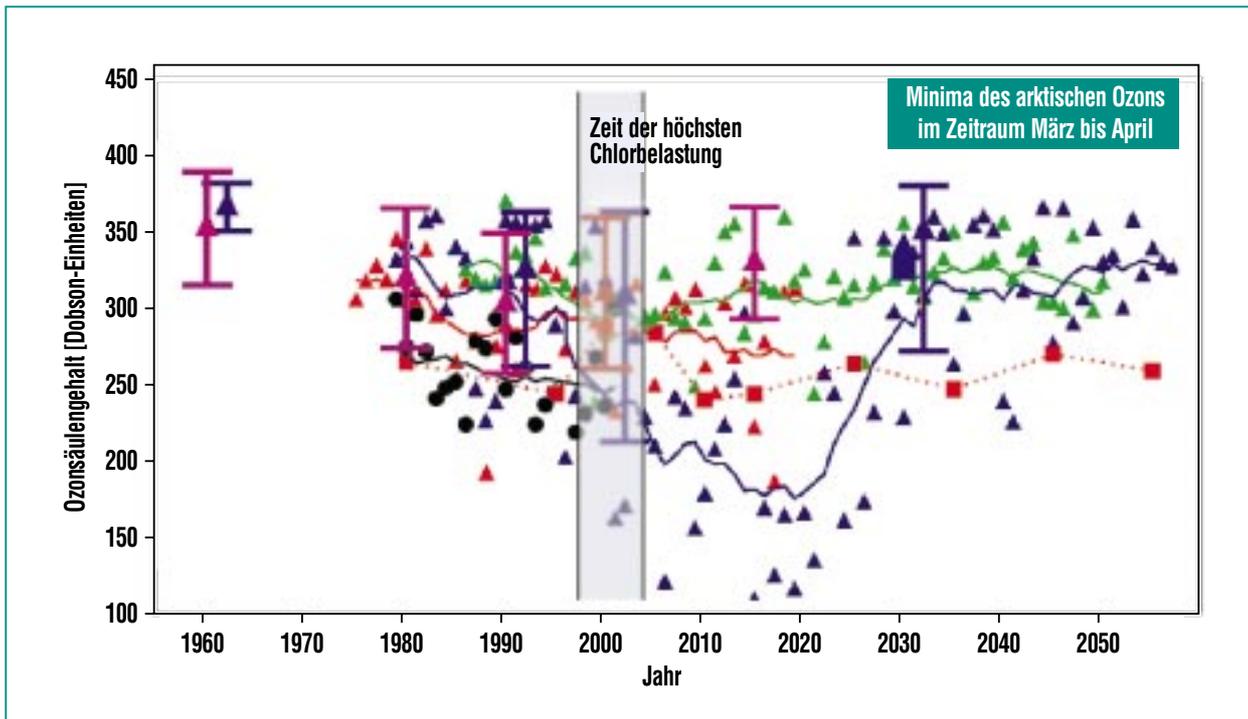


Abb. 2: Vergleich des vom Satelliten TOMS seit 1960 jährlich ermittelten minimalen Ozonsäulengehalts über der Arktis (schwarze Punkte) mit Vorhersagen verschiedener Modelle, die meist das Ozonloch unterschätzen. Die Vorhersagen der Modelle für die kommenden Jahrzehnte zeigen eine große Streuung. Nach [7].

Zeit erfolgreich darum bemüht, wesentliche Beiträge zur Sondierung der Stratosphäre zu erbringen.

Bodengebundene Fernerkundungsinstrumente wurden entwickelt und eingesetzt, um Zeitreihen stratosphärischer Spurenstoffverteilungen zu erfassen [1]. Dem Vorteil der zeitlich nahezu kontinuierlichen Messung steht der Nachteil der beschränkten vertikalen Auflösung der Daten gegenüber. Obwohl diese Geräte ein wesentlicher Bestandteil des globalen Messsystems sind, müssen sie wegen ihrer Nachteile durch andere Messverfahren ergänzt werden.

In den vergangenen Jahrzehnten hat das IMK-ASF eine ganze Fa-

milie von Infrarot-Fourierspektrometern entwickelt und zur Erfassung atmosphärischer Spurenstoffe eingesetzt. Diese technisch hochwertigen Geräte mit dem Namen MIPAS (Michelson Interferometer für Passive Atmosphärische Sondierung) liefern neben der Temperatur und den Konzentrationen von ca. 25 Spurengasen auch Informationen über Aerosole und Wolkenpartikel [2]. Die Bestimmung mikrophysikalischer Parameter von polaren Stratosphärenwolken, die Aufnahme von Salpetersäure in die Wolkenpartikel und die Denitrifizierung durch Sedimentation großer Partikel wurden bei Flügen mit der ballongetragenen Version von MIPAS in den vergangenen Jahren eindrucksvoll demonstriert [3].

Die Vorteile eines flugzeuggetragenen MIPAS kommen insbesondere durch die zweidimensionalen räumlichen Verteilungen von atmosphärischen Parametern entlang der Flugroute zum Tragen [4]. Die Entwicklung dieser Geräte wird gekrönt durch das MIPAS Satellitenexperiment, das seit März 2002 globale dreidimensionale Verteilungen von Spurenstoffen erfasst [5]. Bereits jetzt zeichnet sich ab, dass die MIPAS-Satellitendaten weltweit genutzt und für eine Vielzahl von Forschungsvorhaben wesentliche Informationen liefern werden. Durch das im IMK-ASF aufgebaute Datenverarbeitungssystem für MIPAS-Messungen wird das Institut wesentliche Beiträge für die Stratosphärenforschung leisten können.

Simulation des Zustandes der Atmosphäre mit numerischen Modellen

Voraussetzung für ein besseres Verständnis der stratosphärischen Prozesse ist neben einer exzellenten Datenbasis die Verfügbarkeit eines guten numerischen Modells. Das IMK-ASF hat aus diesem Grund ein Chemie-Transport-Modell (CTM) mit dem Namen KASIMA entwickelt, dessen Einsatz sich bereits in ver-

schiedenen Forschungsvorhaben als sehr nützlich erwiesen hat [6]. Durch den Einbau eines detaillierten mikrophysikalischen Moduls für Wolkenprozesse wird KASIMA eine herausragende Stellung unter den CTMs einnehmen können. Es ist vorgesehen, in Kooperation mit auswärtigen Wissenschaftlergruppen eine sich daraus ergebende Parametrisierung für PSC-Prozesse in Klimamodelle zu integrieren und damit wesentlich genauere Vorhersagen für die Ozonschicht zu erzielen.

Ausblick

Im IMK-ASF sind in den vergangenen Jahren ausgezeichnete Voraussetzungen für die Bearbeitung wissenschaftlicher Fragestellungen in der Stratosphäre geschaffen worden. Nun gilt es, diese Möglichkeiten zu nutzen und auf internationaler Ebene eine hervorragende Rolle zu spielen.

Literatur

- [1] G. Kopp et al.,
in diesem Heft
- [2] H. Fischer,
Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 96,
1992, S. 306-314
- [3] O. Möhler, H. Oelhaf,
in diesem Heft
- [4] C. Blom et al.,
in diesem Heft
- [5] T. v. Clarmann, G. Stiller,
in diesem Heft
- [6] W. Kouker, T. Reddman,
R. Ruhnke,
Nachrichten Heft 4/2002
- [7] J. Austin et al.,
Atm. Chem. Phys., 3, 2003,
S. 1 – 27